ЗН

УДК 004.93'1;004.932

А.М. Недзьведь, А.М. Белоцерковский, П.В. Лукашевич
Объединённый институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси (ОИПИ НАН Беларуси)
Беларусь, 220012, г. Минск, ул. Сурганова, 6

Построение контура объектов интерактивным методом на основе псевдодистанционных карт полутонового изображения

A.M. Nedzved, A.M. Belotserkovsky, P.V. Lukashevich
United Institute of Informatics Problems of The National Academy of Sciences, Belarus
Belarus, 220012, Minsk, Surganova str.,6

Object Tracing with Interactive Method Based on Pseudo-Distance Maps of Grey-Scale Image

А.М. Недзьведь, А.М. Білоцерківський, П.В. Лукашевич
Об'єднаний інститут проблем інформатики Національної академії наук Білорусі
Білорусь, 220012, м. Мінськ, вул. Сурганова, 6

Побудова контуру об'єктів інтерактивним методом на основі псевдодистанційних карт напівтонового зображення

В этой статье предлагаются алгоритмы интерактивного выделения контура объектов на полутоновых изображениях на основе псевдодистанционной карты PDM, упрощенной карты расстояний полутонового изображения, которая использует только те признаки изображения и объектов, которые необходимы для построения оптимального контура. Алгоритмы работают достаточно быстро на больших полутоновых снимках и позволяют получить контур высокого качества по дистанционной карте градиента полутонового изображения, стремящийся к линии скелета «размытой» границы объектов.
Ключевые слова: обработка полутоновых изображений, дистанционная карта, градиент, контур.

In this paper, the algorithms for interactive objects tracing on grey-scale images are proposed that is based on a pseudo-distance map (PDM). The PDM is a simplified distance map of gray-scale image and uses only that features of image and objects that are necessary to build an optimal contour. The algorithms works fast for large gray-scale images and allows constructing a high quality contour that tend to central line.
Key words: grey-scale image processing, distance map, gradient, contour.

У цій статті пропонуються алгоритми інтерактивного виділення контуру предметів на напівтонових зображеннях на основі псевдодистанційної карти PDM. PDM є спрощеною картою відстаней півтонування, яка використовує тільки ті ознаки зображення та об'єктів, які необхідні для побудови оптимального контуру. Алгоритми працюють досить швидко на великих напівтонових знімках і дозволяють отримати контур високої якості на дистанційній мапі градієнта півтонування, що прагне до лінії скелета «розмитої» межі об'єктів.
Ключові слова: обробка напівтонових зображень, дистанційна мапа, градієнт, контур.

Введение

Многие исследователи концентрируют свои усилия на автоматизации выделения объектов на изображениях с последующей ручной коррекцией полученных результа-

тов [1], [2]. На самом деле, полностью автоматические подходы, реализованные в ГИС, медицинских и инженерных приложениях зачастую дают неудовлетворительные дефектные результаты, время коррекции которых вполне сравнимо с «ручным» анализом изображений. Таким образом, интерактивные подходы распознавания по-прежнему актуальны в своем развитии с тем, чтобы облегчить работу оператора при полном пользовательском контроле над процессом сегментации и распознавания. Следует отметить, что любой, существующий на сегодняшний день, подход, качественно решает задачу только для определённого класса изображений, поэтому автоматизированный анализ нового класса изображений диктует необходимость разработки новых или модернизации существующих алгоритмов сегментации.

Известно, что существуют методы интерактивной сегментации, основанные либо на выделении областей, либо на выделении границ [3], [4]. Инструмент «волшебная палочка» («magic wand tool») [5], реализованный в большинстве коммерческих систем обработки изображений, принадлежит к первому типу и позволяет пользователю интерактивно выбирать затравочные (седловые) точки для дальнейшего «роста» областей, добавляя смежные соседние пиксели в соответствии с некоторым критерием однородности [6].

Метод «активных контуров» (известный как «snake») – достаточно популярный подход для выделения границ, позволяющий устанавливать начальную кривую как первоначальную аппроксимацию выделяемого контура, изменяемую внешними и внутренними «силами» на следующих этапах [1]. Окончательная граница оценивается путем минимизации энергии функционала. Однако этим процессом достаточно тяжело управлять интерактивно. Более того, реализация «magic wand» and «snake» довольно сложна с точки зрения поддержки интерактивного визуального отклика во время выполнения алгоритма.

Другой, широко известный подход, основанный на выделении краев, «live-wire» [3], для нахождения границы выделяемого объекта применяет поиск глобального оптимального пути. Пиксели в алгоритме рассматриваются как узлы ориентированного графа, стоимость же основана на граничных признаках, приписанных дугам графа. Далее рассчитывается путь с минимальной стоимостью, от седловой точки к каждому пикселю изображения. Пользователь достигает желаемого результата сегментации, перемещая курсор вдоль границы объекта. Подходы такого плана, однако, могут выделять лишь площадные объекты, в то время, как множество задач требует определение средней линии протяженных объектов.

В данной работе авторы предлагают два подхода для интерактивного выделения объектов: подход, основанный на аккумуляции связных компонент, и подход, в основе которого лежит парадигма «live-wire». В отличие от всех схожих технологий интерактивной сегментации, предлагаемый подход позволяет выделять как площадные объекты, определяя их контур, так и линейные, выделяя их скелетное представление.

Средние линии выделяются с использованием новой схемы, обобщающей псевдодистанционные преобразования (PDT) [7] на полутоновых изображениях, анализируя признаковое расстояние даже при отсутствии градиента на выделяемых областях.

Трассировка объектов

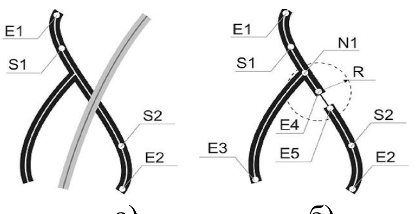
Как известно, цель сегментации – разделить исследуемое пространство на части (сегменты), обладающие сходными характеристиками или функциональными особенностями, отличными от характеристик других сегментов. Большинство успешно реализованных в коммерческих системах – «полуинтерактивные», ориентированные на выделение и анализ контуров, методы, требующие вмешательства пользователя для настройки

параметров, для конечной корректировки результата сегментации, либо для «слежения» за формируемым контуром в реальном режиме времени. В целом, методика, построенная в соответствии с последними принципами, иначе называется *трассировкой* (объекта). В нашем случае «Magic wand», парадигма «live-wire» относятся к такому типу сегментации.

Рассматривая случай, когда два линейных объекта частично перекрываются (рис. 1а), можно предположить, что целью сегментации является векторное представление пикселей $E1$ и $E2$ (рис. 1а). В этом случае определяются два узловых пикселя, $S1$ и $S2$ (рис. 1а), и выделяются две связные компоненты (рис. 1б). Если существует возможность получения связного пути между $S1$ и $S2$, то векторизация может быть проведена автоматически без дальнейшего вмешательства со стороны пользователя. Однако, перекрытия и пересечения встречаются достаточно часто, следовательно необходима дальнейшая обработка для поиска пути между точками (реконструкция объектов). Сначала для решения данной задачи применяется утоньшение для построения скелета каждой компоненты (отмечен тонкой белой линией на рис. 1 и 2). Далее, определяются характерные пиксели. Следует различать три типа характерных пикселей:

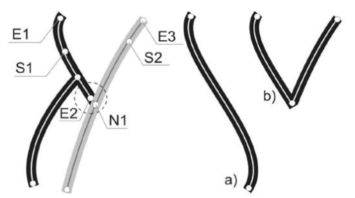
– концевые пиксели;
– узловые пиксели;
– связные пиксели.

Путь между затравочными пикселями может быть найден, как только характерные пиксели будут помечены. Было проведено исследование соседства каждой концевой точки для того, чтобы отыскать места, в которых необходимо провести линейную аппроксимацию. Для каждого концевого пикселя, принадлежащего одной связной компоненте, подсчитывается расстояние до ближайшего пикселя на скелете другой компоненты. Пара пикселей, имеющих кратчайшее расстояние, соединяется линией (рис. 1б). Верхний предел R находится на пути этих соединяемых линий. В любое время пользователь может решить, надо ли строить линию между пикселями и как это делать: выбрать наиболее подходящий путь, варьировать R или переключиться в ручной режим аппроксимации. Результаты такой обработки (трассировки) исследуемых объектов показаны на рис 2б.



а) б)

Рисунок 1 – Взаимодействие двух объектов (а); выделенные компоненты (б)



а) б)

Рисунок 2 – Построение контура линейного объекта (а);
и результат трассировки (б)

При вычислении параметров, описывающих взаимное влияние пикселей изображения, дистанционное преобразование (DT) является одним из наиболее известных и хорошо проработанных подходов. В определении дистанционного преобразования для

бинарных изображений рассматривают пиксели «объекта» (предположим, равные 1) и пиксели «фона» (предположим, равные 0). Для исходного изображения строится дистанционная карта (DM), в которой каждому пикселю исходного изображения ставится в соответствие неотрицательное число, представляющее собой минимальное расстояние от текущего пикселя до пикселя, принадлежащего к группе «объект».

Свойства дистанционного преобразования широко используются для сегментации, распознавания, быстрой математической морфологии и в других задачах обработки изображений, однако построение полной карты для полутоновых изображений является сложным и затратным по времени. Предлагаемое в статье утоньшение полутонового изображения функционирует на базе предлагаемого упрощенного подхода, что является ключевым моментом алгоритма в целом.

Построение псевдодистанционной карты расстояний

Для решения проблем связных со скоростью и качеством построения скелета был разработан новый алгоритм, базирующийся на карте псевдорасстояния (Pseudo- Distance Map, PDM), которая является упрощенной картой расстояний полутонового изображения и использует только особенности изображения, необходимые для построения скелета.

Строго говоря, PDM не является дистанционной картой, но она отражает топологические характеристики полутона, что достаточно для получения высококачественного скелета. Кроме того, алгоритм утоньшения, основанный на PDM, намного быстрее обычных полутоновых алгоритмов утоньшения на растровой основе [8]. Разработанный алгоритм, включает следующие шаги:

1) построение псевдодистанционной карты;
2) определение основных топологических особенностей;
3) построение полутонового скелета;
4) бинаризация скелета.

Дистанционная карта формируется посредством определения областей изображения, в которых пиксели помечены их расстоянием до края объекта [9]. Для бинарного изображения она представлена с помощью полутонового изображения, для полутонового – ее размерность существенно увеличивается [10]. Построение карты расстояний для полутоновых изображений – достаточно сложная задача. Это связано с тем, что увеличивается размерность, полутоновое изображение трехмерное, а карта расстояний для него является четырехмерной. Для построения скелета не нужны дистанционные свойства [11]. Скелет отражает топологические свойства объекта и должен проходить через точки хребта, то есть через:

– точки локальных максимумов или пиковые точки (которые не имеют соседей, превышающих их по величине);

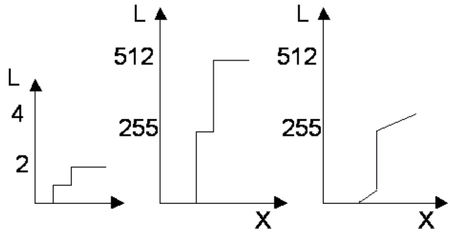
– точки седла (через которые в их окрестности пролегает единственно возможный путь между их максимальными соседями);

– узловые точки (единственным образом соединяющие более трех соседей, равных или превышающих их по величине);

Вместе с тем, скелет не должен проходить через точки локальных минимумов (не имеющие соседей с меньшей величиной).

Рассмотрим полутоновое изображение как набор слоев, когда каждый более низкий слой включает пиксели предыдущего слоя. Стандартное полутоновое изображение в традиционной вычислительной технике имеет 256 уровней. Таким образом, если каждый бинарный слой увеличить на 256 значений, будет достаточно пространства для построения

дистанционной карты расстояний каждого слоя (рис 3). В результате, формируется набор из 256 слоев изображения с диапазоном значений пикселей от 0 до 255 для каждого слоя.



а) б) в)

Рисунок 3 – Представление профиля изображений: исходного полутонового (а); полутонового преобразованного (б); псевдодистанционной карты (в)

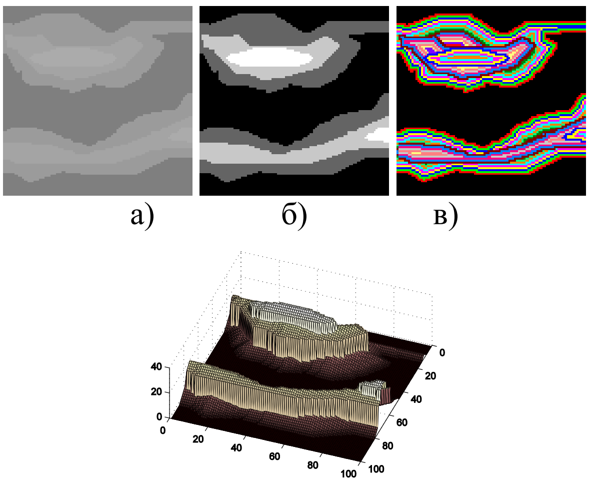
Для оптимизации процесса построения PDM используется метрика Чамфера, которая является простой в вычислениях и позволяет получить оптимальное соотношение скорости и качества [12].

Для построения карты был использован модернизированный двухпроходный алгоритм, на основе анализа локальных минимумов. Первый проход выполняется в двух направлениях: сверху вниз и слева направо. Во время прохода каждый пиксель меняется по следующим условиям

$$p = \begin{cases} (p_i + f_i), & \text{если} \quad (p_i + f_i < p) \text{ и } (p_i + f_i \geq L(p)),\ i = 0,\dots,n \\ L(p), & \text{если} \quad (p_i + f_i < L(p)),\ i = 0,\dots,n \\ p, & \text{в другом случае} \end{cases}, \quad (1)$$

где p – значение пикселя; $L(p)$ – значение бинарного слоя в картинке; p_i – значение пикселей окружения; f_i – значения векторов в таблице-маске для метрики; i – индекс элемента в таблице-маске для метрики, n – число элементов в таблице.

Второй проход выполняется при тех же условиях в направлениях снизу вверх, справа налево. В результате формируется псевдодистанционная карта, на которой отображены основные топологические особенности изображения (рис.4).



г)

Рисунок 4 – Исходное полутоновое изображение (а), полутоновое изображение, умноженное на 256 (б), псевдодистанционная карта (в), и 3D-представление псевдодистанционной карты (г)

Таким образом, PDM соответствуют слоям наборов карт расстояния. Каждый слой PDM начинается с уровня яркости, кратного 256, и яркость каждого пикселя отражает расстояние до ближайшего слоя с более низким уровнем (рис. 4).

Определение контура объекта

Как упоминалось выше, на сегодняшний день предложено много интерактивных методов сегментации, в том числе, основанных на глобальном поиске оптимального пути, на ориентированном графе.

Под оптимальным путем понимается путь с наименьшей стоимостью.

Изображение или часть изображения рассматривается как ориентированный граф, в котором пиксели соответствуют узлам графа, а связи с соседями соответствуют дугам графа. Каждой дуге графа назначается цена или весовой коэффициент, который вычисляется по ряду свойств, характеризующих принадлежность пикселя к границе объекта. В описываемом алгоритме предлагается для оценки этой принадлежности использовать псевдо-дистанционную карту.

Граф G задается множеством точек или вершин $x_1, x_2, ..., x_n$ (которое обозначается через X) и множеством линий или ребер $a_1, a_2, ..., a_m$ (которое обозначается символом A), соединяющих между собой все или часть этих точек. Таким образом, граф G полностью задается парой $\{X, A\}$.

Если ребра из A ориентированы (обычно показано стрелкой), то они называются дугами, а граф с такими ребрами − ориентированным графом. Иногда дугам графа G ставится в соответствие некоторое число w, определяемое на PDM, называемое весом, или длиной, или стоимостью (ценой) дуги.

Тогда граф G называется графом со взвешенными дугами. При рассмотрении пути μ, представленного последовательностью дуг $(a_1, a_2, ..., a_n)$, за его вес (или длину, или стоимость) принимают число $l(\mu)$, равное сумме весов всех дуг, входящих в μ, т. е.:

$$l(\mu) = \sum_{i=1}^{n} w_i . \qquad (2)$$

Для изображения I с размерами $H \times W$ каждый пиксель изображения p_i определяется как вершина графа, которая связана со своими ближайшими соседями q_i в четырехсвязной области (рис. 5). Каждой дуге (p_i, q_i) определяется весовой коэффициент $w_{p_i q_j}$, характеризующий принадлежность пикселя к границе. Значение $w_{p_i q_j}$ лежит в интервале $[L, H]$. Для назначения весовых коэффициентов используется пиксельное силовое преобразование [13].

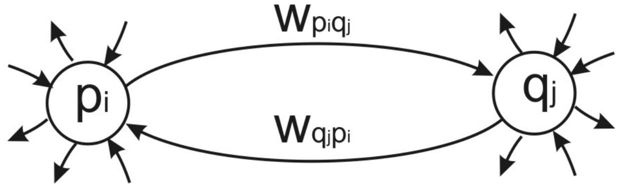


Рисунок 5 – Модель ориентированного графа

Задача поиска контура между любыми двумя точками изображения формулируется как поиск пути на графе с минимальной суммарной ценой. В результате, опре-

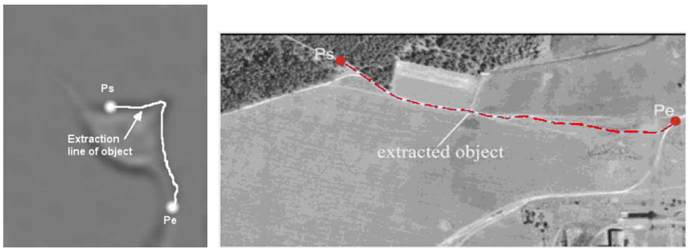
деление границ объектов можно рассматривать в виде задачи оптимального пути между начальным и конечным узлами. Таким образом, каждому ребру графа присваивается свой вес, а значение общего веса, накопленного по определенному пути, должно быть сведено к минимуму.

Вес определяется как значение пикселя на псевдодистанционной карте. Это самое простое и точное определение критерия границы, так как PDM сохраняет топологию изображения. Расстояние до границы определяется по росту значений пикселей на PDM. Таким образом, в рамках этого критерия, задача определения границы объекта аналогична задаче утоньшения. Веса $w_{p_i q_j}$ определяются по следующей формуле:

$$w_{p_i q_j} = -\left|F_{p_i}\right|. \quad (3)$$

С помощью метода динамического программирования [3] можно просчитать минимальный вес пути между начальной и конечной точками. Следует отметить, что метод позволяет вычислить минимальный вес между фиксированным стартовым пикселем и другими пикселями одновременно. Другими словами, только определив начальный пиксель вручную, пользователь может получить минимальный вес пути к любому другому пикселю.

Таким образом, для интерактивного определения контура стартовый пиксель – это затравочная (седловая) точка, а конечный пиксель – есть любая «свободная» точка. На рис. 6 показан пример работы алгоритма для изображений разных типов.



а) б)

Рисунок 6 – Результат определения контура для: а) нейрона на цитологическом изображении; б) дороги на аэрокосмическом изображении

Выводы

Предлагаемый алгоритм сегментации имеет эффективную (в смысле времени выполнения) реализацию парадигмы «live-wire». Для поиска глобального оптимального пути предлагается использовать улучшенный алгоритм с использованием псевдодистанционной карты, позволяющей находить оптимальный путь с меньшими временными затратами. Также в реализации алгоритма поиска оптимального пути предлагается использовать эффективную схему организации внутренних структур хранения графа и быстрого поиска. Данная схема обеспечивает сравнительно постоянное время вставки, удаления и поиска узла графа с минимальной стоимостью в сортированном списке.

В отличие от всех похожих технологий интерактивной сегментации, предлагаемый алгоритм позволяет выделять как площадные объекты, определяя их контур, так и линейные объекты, выделяя их скелетное представление. Данное свойство было отестировано на задачах сегментации площадных и линейных объектов на медицинских изображениях и аэрокосмических снимках.

Литература

1. Automatic extraction of roads from aerial images based on scale space and snakes, Machine Vision and Applications / [Laptev I. et al.]. – 2000. – v. 12. – P .23-31.
2. Mena J.B. State of the art on automatic road extraction for GIS update: a novel classification, Pattern Recognition Letters / Mena J.B. – 2003. – v. 24. - P. 3037-3058.
3. User-Steered image segmentation paradigms: live wire and live lane, Graphical Models and Image Processing / [Falco X.A., Udapa J.K. et al.]. – 1998. – v. 60. – P. 233-260.
4. Frucci M. Object Detection in Watershed Partitioned Gray-Level Images / M. Frucci, Sanniti G.di Baja // Mass Data Analysis of Signals and Images in Medicine, Biotechnology and Chemistry, 2007. – P. 94-103.
5. Bucha V. .Image pixel interaction and application to image processing / V. Bucha, S. Ablameyko // Pattern Recognition and Image Analysis. – 2005. – № 15, v. 1. – P. 136-138.
6. Bucha V. Intellectual semi-automated vectorization of multicolor cartographic objects / V. Bucha, S. Ablameyko , T. Pridmore // Visual information engineering : Proceedings of IEE international conference. – University of Glasgow, 2005. – P. 115-120.
7. Jang J.J. Linear band detection based on the Euclidean distance transform and a new line segment extraction method / J.J. Jang, K.S. Hong // Pattern Recognition. – 2001. – № .34, v. 9. – P. 1751-1764.
8. Недзьведь А.М. Быстрый метод выделения сети сосудов на полутоновых ангиографических изображениях / А.М. Недзьведь, С.В. Абламейко, А.М. Белоцерковский // Тез. докл. Междунар. научн. конф. «Интеллектуализация обработки информации 2006» Симферополь 2006. – С. 60.
9. Serra J. Image Analysis and Mathematical Morphology / Serra J. – London : ACADEMIC PRESS, Inc. (Harcourt Brace Jovanovich, Publishers), 1982. – 610 p.
10. Shih F.Y. Image Processing and Mathematical Morphology Fundamentals and Applications / Shih F.Y. – Boca Raton : CRC Press, 2009. – P. 415.
11. Недзьведь А.М. Алгоритм выделения и анализа ветвящихся объектов / А.М. Недзьведь, А.М. Белоцерковский, С.В. Абламейко // Интеллектуализация обработки информации : Тезисы докладов Международной научной конференции. Крымский научный центр НАН Украины. – Симферополь, 2008. – С. 185-186.
12. Boomgaard R. Mathematical Morphology: Extension Towards Computer Vision / Boomgaard R. – Academisch Proefscrift. Faculteit der Wiskunde en Informatica de Universiteit van Amsterdam, 1992. – 155 p.
13. Bucha V. Intellectual semi-automated vectorization of multicolor cartographic objects / V. Bucha, S. Ablameyko, T. Pridmore // The IEE International Conference on Visual Information Engineering (VIE) Convergence in Graphics and Vision 4 – 6 April 2005, University of Glasgow, UK. – 2005. – P. 115-120.

Literature

1. Laptev I., et al. Automatic extraction of roads from aerial images based on scale space and snakes, Machine Vision and Applications, v. 12: 2000. – P. 23-31.
2. Mena J.B. State of the art on automatic road extraction for GIS update: a novel classification, Pattern Recognition Letters, v. 24. 2003. – P. 3037-3058.
3. Falco X.A., Udapa J.K. et al. User-Steered image segmentation paradigms: live wire and live lane, Graphical Models and Image Processing. – v. 60, 1998. – P. .233-260.
4. Frucci M., G. Sanniti di Baja Object Detection in Watershed Partitioned Gray-Level Images. Mass Data Analysis of Signals and Images in Medicine, Biotechnology and Chemistry, 2007. – P. 94-103
5. Bucha V., Ablameyko S. Image pixel interaction and application to image processing, Pattern Recognition and Image Analysis. – № 15, v. 1. – 2005. – P. 136-138.
6. Bucha V., Ablameyko S., Pridmore T. Intellectual semi-automated vectorization of multicolor cartographic objects, Visual information engineering: Proceedings of IEE international conference. – University of Glasgow, 2005. – P. 115-120.
7. Jang J.J., Hong K.S. Linear band detection based on the Euclidean distance transform and a new line segment extraction method, Pattern Recognition. – № 34, v. 9. – 2001. – P. 1751-1764.
8. Nedzved A.M.,.Ablameyko S.V, Belotserkovsky A.M., Lehmann T.-M. Fast method of extraction of the network of vessels on gray angiography images // Artificial Intelligent, No2. Donetsk, 2006. – P. 206-211 (in Russian).
9. Serra J. Image Analysis and Mathematical Morphology / J. Serra. – London : ACADEMIC PRESS, Inc. (Harcourt Brace Jovanovich, Publishers), 1982. – 610 p.

10. Shih F.Y. Image Processing and Mathematical Morphology Fundamentals and Applications / F.Y. Shih. – Boca Raton : CRC Press, 2009. – P. 415.
11. Nedzved A.M., Belotserkovsky A.M., Ablameyko S.V., Maziewski A. Algorithm of Extraction and Analysis of Branch Objects // Tavricheski Vestnik Informatiki I Matematiki. – № 2, Simferopol, 2008. – P. 111-120 (in Russian).
12. Boomgaard R. Mathematical Morphology: Extension Towards Computer Vision / R. Boomgaard. – Academisch Proefscrift. Faculteit der Wiskunde en Informatica de Universiteit van Amsterdam, 1992. – 155 p.
13. Bucha V., Ablameyko S., Pridmore T. Intellectual semi-automated vectorization of multicolor cartographic objects // The IEE International Conference on Visual Information Engineering (VIE) Convergence in Graphics and Vision 4-6 April 2005, University of Glasgow, UK. − 2005. − P. 115-120.

RESUME

A.M. Nedzved, A.M. Belotserkovsky, AP.V. Lukashevich

Object Tracing with Interactive Method Based on Pseudo-Distance Maps of Grey-Scale Image

The paper describes the approaches that underpin effective interactive tools for gray-scale image segmentation. Enhanced interactive component allowed to conduct high-quality tracing and select objects where automated systems give incorrect results.

A distinctive feature of the proposed method for constructing objects' contour is to use a pseudo-distance map, which allows to obtain high-quality skeleton on the optimal path between pixels. The main advantage of PDM is the relative ease of implementation with increased quality of edge detection in areas where the gradient is absent, as well as the speed of the algorithm in comparison with other raster-oriented algorithms.

Статья поступила в редакцию 22.04.2013.